

강관으로 보강된 중공 R.C 기둥의 중공비에 따른 거동

최준호*, 윤기용*

*선문대학교 토목공학과

e-mail: kyyoon@sunmoon.ac.kr

Behaviors of Hollow R.C Columns with Internal Steel Tube by Hollow Ratio

Jun-Ho Choi*, Ki-Yong Yoon*

*Dept of Civil Engineering, Sunmoon University

요 약

중공 R.C 기둥은 중실 R.C 기둥에 비해 자중의 감소나 재료의 절감의 장점을 가지고 있다. 하지만 중공 R.C 기둥은 안쪽면의 취성파괴로 인하여 낮은 연성 거동을 할 가능성이 있다. 이러한 문제점을 해결하기 위해 중공 부재 내의 콘크리트 3축 구속 상태로 존재하게 하는 강관으로 보강된 중공 R.C 기둥이 강영중, 한택희 (2005) 등에 의해 개발되었다. 본 연구는 강관으로 보강된 중공 R.C 기둥에 대하여 중공비를 0.5~0.85까지 변화 시켜 중공비에 따른 작용하중에 대한 안전율, 연성도, 재료비에 대한 거동 특성을 파악하였다.

1. 서론

오늘날 교각은 보편적으로 중실 R.C 기둥(Solid reinforced concrete column, Solid R.C Column)에 대한 연구가 활발히 진행되어 전체 교각의 대부분에 적용되었다. 기둥의 자중의 감소나 재료의 절감의 장점으로 중공 R.C 기둥(Hollow reinforced concrete column)이 사용되고 있다. 중공 R.C 기둥의 경우 동일 단면적을 갖는 일반 중실 기둥에 비해, 더 큰 단면이차모멘트를 갖게 되므로 더 효율적인 단면 활용이 가능하다. 하지만 이러한 장점에도 불구하고, 중공 R.C 기둥은 안쪽면의 취성파괴로 인하여 낮은 연성 거동을 할 가능성이 있다. 이러한 중공 R.C 기둥의 문제점을 해결하기 위하여, 중공 R.C 기둥의 내부에 강관을 삽입하여 내부 구속력을 발생시킴으로써, 중공부재 내의 콘크리트를 3축 구속 상태로 존재하게 하는 내부 구속 중공 R.C 기둥(ICH-R.C Column)이 강영중, 한택희(2005) 등에 의해 개발되었다.

본 연구는 Prototype으로 Solid R.C 기둥을 선택하여 종방향 철근 및 횡방향 철근에 대한 검토, 작

용하중에 대한 안전율 검토를 하였으며, Prototype으로 결정된 Solid R.C 기둥을 중공비 0.5~0.85까지 변화 시켰다. 중공비에 따른 강관으로 보강된 중공 R.C 기둥의 내부강관 두께는 내부강관의 항복에 대한 최소두께를 사용하였으며, 중공비에 따른 작용하중에 대한 안전율, 중공비에 따른 연성도 및 재료비의 거동 특성을 파악하였다. 각각에 대한 거동 특성 파악을 위해 사용된 프로그램은 한택희(2005)가 개발한 프로그램으로 Material Model Program, Axial Force-Moment Interaction Analysis Program, Force-Displacement Analysis Program을 사용하였다.

2. 거동 분석을 위한 기본 이론

2.1 강관으로 보강된 중공 R.C기둥의 재료 모델

형구속된 철근 콘크리트의 거동에 대한 초기의 여러 연구에 의해, 구속된 콘크리트의 강도에 대해 Mander et al.(1988)은 다음과 같은 관계식을 제안하였다.

$$f_c = \frac{f'_{cc} x r}{r - 1 + x^r} \quad (1)$$

$$x = \frac{\epsilon}{\epsilon_{cc}} \quad (2)$$

$$r = \frac{E_c}{(E_c - E_{sec})} \quad (3)$$

$$E_{sec} = \frac{f'_{cc}}{\epsilon_{cc}} \quad (4)$$

여기서, f_c : 콘크리트의 응력, ϵ : 축방향 변형률
 f'_{cc} : 구속된 콘크리트의 최대 강도
 ϵ_{cc} : 구속된 콘크리트가 최대 강도를 발휘할 때의 변형률

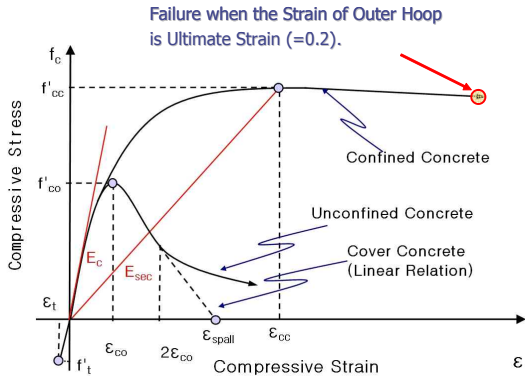


그림 1. 구속된 콘크리트와 구속되지 않은 콘크리트의 응력-변형률 곡선

비구속 콘크리트의 접선 계수(E_c :tangent modulus)는 $5000\sqrt{f'_{cc}}$ (MPa)로 산정되며, 구속된 콘크리트의 최대 강도(f'_{cc})는 식5에 의해서 구할 수 있다.

$$f'_{cc} = f'_c \left(2.254 \sqrt{1 + \frac{7.94f'_l}{f'_c}} - \frac{f'_l}{f'_c} - 1.254 \right) \quad (5)$$

$$\epsilon_{cc} = \epsilon_{co} \left[1 + 5 \left(\frac{f'_{cc}}{f'_c} - 1 \right) \right] \quad (6)$$

$$f'_l = k_e \cdot f_l \quad (7)$$

여기서 f'_c 는 비구속된 콘크리트의 최대 강도이며, f'_l 는 유효 구속응력이다. 구속된 콘크리트의 최대 강도에서의 변형률 ϵ_{cc} 는 식6과 같이 비구속된 콘크리트의 최대 강도에 해당하는 변형률 ϵ_{co} 의 gkatnf서 정의되며, ϵ_{co} 는 일반적으로 0.002로 알려져 있다.

내부 강관의 좌굴강도와 항복강도는 강관의 두께에 큰 영향을 받으므로, 강관으로 보강된 중공 R.C 기둥의 파괴 모드는 튜브의 두께를 변화시킴으로써 조절될 수 있다. 내부 튜브의 항복 이전에 바깥쪽 후프철근의 파괴를 유발하기 위해서는 튜브에 작용

하는 응력이 튜브의 항복강도(f_{ty})보다 작아야 한다.(한택희,2005)

$$t > \frac{D_i \cdot f_{yh} \cdot A_{sp}}{D' \cdot s \cdot f_{yt}} = t_y \quad (8)$$

여기서, D' 은 구속된 콘크리트의 직경, D_i 는 중공의 직경, f_{yh} 는 후프철근의 항복강도, A_{sp} 는 후프철근의 단면적, s 는 후프철근의 배근 간격이며, t_y 는 내부 튜브의 항복 파괴가 발생하지 않기 위한 튜브의 최소 두께이다.

2.2 거동분석을 위한 규정 및 평가 방법

거동 분석을 위해 도로교설계기준에 제시 되어 있는 중방향 철근비, 중방향 철근의 최소 순간격, 횡방향 철근의 최소 순간격, 횡방향 철근비등의 규정을 만족해야 한다.

연성도 평가 방법으로는 변위 연성도, 곡률연성도, 에너지 연성도 등이 있으며, 변위 연성도 및 에너지 연성도에 대해서는 다음과 같이 정의한다.

$$\text{변위연성도 } \mu_{\Delta} = \frac{\Delta u}{\Delta y} \quad (8)$$

$$\text{에너지연성도 } \mu_E = \frac{Eu}{Ey} \quad (9)$$

여기서, Δy : 최대 응답 변위

Δu : 파괴상태까지 나타난 최대응답변위

Eu : 극한상태까지 분석된 총 입력 에너지

Ey : 항복상태까지 분석된 총 입력 에너지

단면력 검토 시 작용 하중에 대한 안전율(Safety Factor, S.F)은 원점으로부터 작용 하중 시까지의 길이에 대한 원점으로부터 작용 하중 시까지의 연장선과 P-M Curvature와 만나는 점까지의 거리비로 구한다.

경제성 평가 방법은 다양한 방법이 있지만 본 논문에서는 교각을 만들기 위한 순수 재료비만을 가지고 경제성 평가를 수행하였다. 철근(이형철근)및 콘크리트, 강관의 재료비 산출 단가는 2006년 정부 구매물자 가격을 기준으로 하였다.

3. 해석 모델

3.1 Solid R.C기둥의 해석 모델

Prototype 선정을 위해 외경이 210cm인 Solid R.C 기둥의 단면을 가지고 중방향 철근의 지름과 중방향 철근의 개수를 달리 하여 4가지 종류의 철근비 및 최소 순간격에 대한 검토를 하였고, 횡방향

철근의 간격을 5cm로 시작하여 1cm씩 늘려 10cm까지 나선철근비에 대한 검토를 하였고, 감도계수를 고려한 P-M상관도를 작성하여 안전율에 대한 검토하였다.

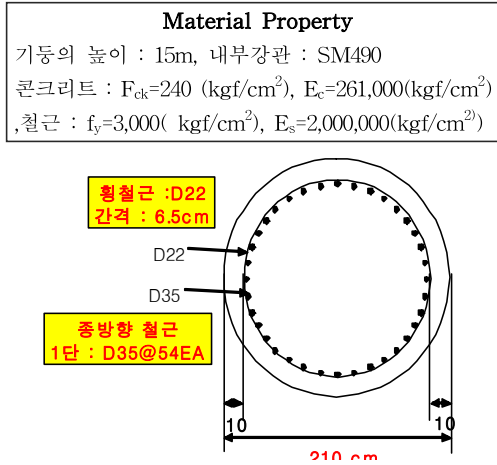


그림 2. Solid R.C 기둥의 해석 모델

하며 모델에 대한 이름의 앞의 숫자는 중공비를 뜻하고 뒤의 숫자는 사용된 내부강관 두께를 말한다. (예를 들면 H050T04는 중공비가 0.50이고 사용된 내부강관 두께는 0.4cm를 말한다.)

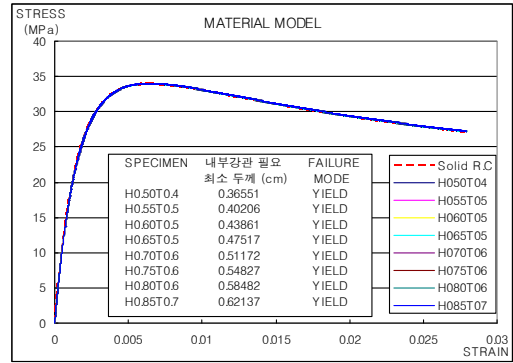


그림 4. 중공비에 따른 ICH-R.C 기둥의 응력-변형률 선도

4. 중공비에 따른 강관으로 보강된 중공 R.C 기둥의 거동

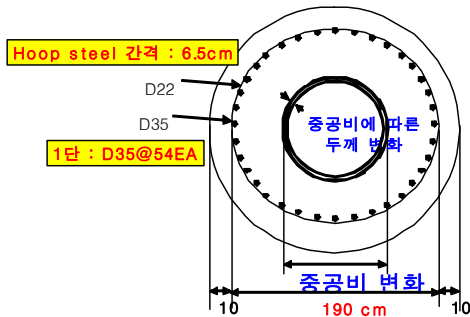


그림 3. ICH-R.C 기둥 단면의 중공비 변화

해석모델로 결정된 Solid R.C 기둥을 대상으로 ICH-R.C 기둥의 중공비에 따른 거동을 파악한다. 중공비는 심부구속철근의 바깥지름에 대한 중공지름의 비율로 0.5~0.85까지 변화 시켰으며 ICH-R.C 기둥의 단면은 그림3과 같다.

4.1 중공비에 따른 내부강관 최소 필요 두께 산정 및 종방향 철근비 검토

ICH-R.C 기둥의 중공비 변화 시 심부구속효과를 고려하기 위하여 심부구속효과에 필요한 내부강관의 최소두께를 사용하였으며 최소두께 결정시 강관의 두께를 mm단위로 최소 필요 두께를 산정하였다.

그림4에서와 같이 Solid R.C 기둥과 중공비를 변화시킨 ICH-R.C 기둥의 응력-변형률 선도는 동일

중공비에 따라 최소 필요 두께의 강관을 삽입하였을 경우 종방향 철근비에 대해서는 각각의 종류에 대하여 모두 만족한다.

표 1. 중공비에 따른 종방향 철근비 검토

SPECIMEN EN	종방향 철근			중공지름 (cm)	종방향 철근 단면적 (cm ²)	압축 부재 단면적 (cm ²)	철근비 (%)	검토
	직경 (cm)	수량 (EA)	강관 두께 (cm)					
Solid R.C	3.5	54	0.0	0.0	519.54	34636.05	1.500	OK
H050T04	3.5	54	0.4	95.0	638.42	27666.71	2.308	OK
H055T05	3.5	54	0.5	104.5	682.90	26222.67	2.604	OK
H060T05	3.5	54	0.5	114.0	697.83	24607.30	2.836	OK
H065T05	3.5	54	0.5	123.5	712.75	22850.17	3.119	OK
H070T06	3.5	54	0.6	133.0	769.11	20992.71	3.664	OK
H075T06	3.5	54	0.6	142.5	787.02	18955.04	4.152	OK
H080T06	3.5	54	0.6	152.0	804.92	16775.60	4.798	OK
H085T07	3.5	54	0.7	161.5	873.16	14504.72	6.020	OK

4.2. 중공비에 따른 작용하중에 대한 안전율

ICH-R.C 기둥에서 중공비를 증가 시키면 P-M 상관도에서 압축력은 중공비에 따라 일정한 비율로 작아진다. 또한 중공비가 증가함에 따라 휨모멘트가 증가하는 하지만 중공비의 증가율만큼의 휨모멘트 증가량은 보이지 않는다(그림5). 이와 같은 이유는 콘크리트, 철근 및 강관이 외력에 대하여 받는 단면력이 다르기 때문이다. 단면력을 압축력과 휨모멘트력으로 분류하고 각 재료에 대해서 콘크리트, 철근, 강관에 대해서 비교해 본다면 다음과 같다.

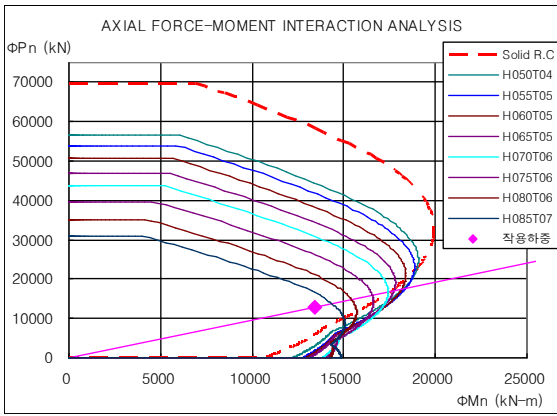


그림 5. 중공비에 따른 P-M 상관도

단면적의 변화량은 각 부재에 대한 압축력과 휨 모멘트에 대한 변화를 가져 온다. 동일한 외경 내에 중공비를 증가시킴으로 인하여 콘크리트의 단면적은 감소하고 강관의 단면적은 최소 필요 강관두께가 증가하므로 강관의 단면적은 증가한다. 중공비 변화량에 대한 콘크리트 단면적의 감소율에 비해 강관의 단면적의 증가율은 상대적으로 작다. 휨모멘트력은 부재가 받는 축력에 대한 영향과 모멘트 팔의 길이 변화에 대한 영향이 있다. 앞에서 서술한 바와 같이 부재가 받는 축력은 콘크리트에 대한 영향이 강관에 대한 영향보다 크다. 모멘트 팔의길이 변화량은 증가하는 하지만 동일한 외경 내에서 중공비가 변화하므로 그 변화량은 작다.

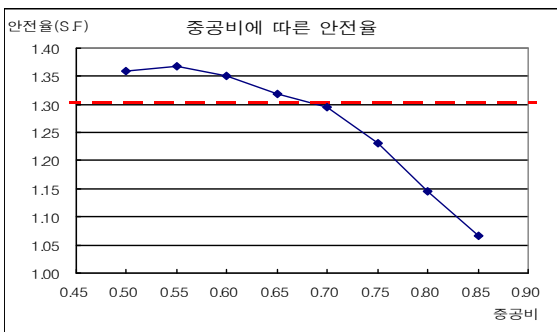


그림 6. 중공비에 따른 안전율

그림6은 중공비에 따른 안전율을 나타내는 곡선이며 점선으로 표시된 것은 해석모델(Solid R.C기둥)에 대한 안전율이다. 중공비가 크면 작용하중에 대한 안전율이 꼭 줄어드는 것은 아니다. 작용하중의 크기의 변화에 따라 변할 수가 있다. 중공비에 따른 ICH-R.C기둥의 안전율이 모두 1이상 확보 되므로 작용하중에 대한 안전율은 모두 안전하다.

4.3 중공비에 따른 연성도

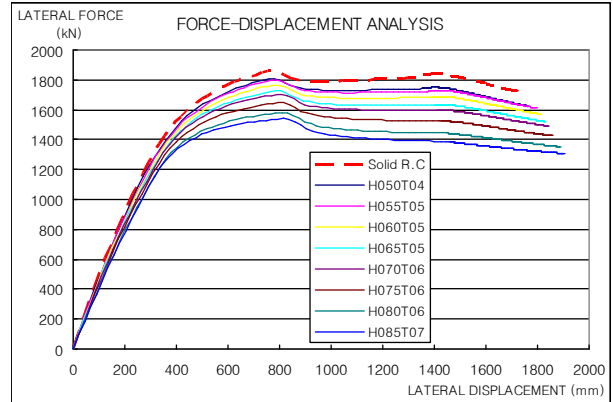


그림 7. 중공비에 따른 하중-변위 곡선

표 2. 중공비에 따른 연성도

SPECIMEN	변위 연성도 ($\mu_{\Delta 1}$)			에너지 연성도 (μ_{E1})			
	극한 변위 (Δu_1) (mm)	항복 변위 (Δy) (mm)	$\mu_{\Delta 1}$	Eu1 (kN-mm)	Ey (kN-mm)	μ_{E1}	
Solid R.C	1753.429	463.669	3.782	2758004.821	446981.454	6.170	
ICH-R.C	H050T04	1767.254	456.599	3.870	2683332.081	425075.630	6.313
	H055T05	1797.402	458.946	3.916	2710627.494	423531.999	6.400
	H060T05	1812.897	456.612	3.970	2681605.891	413277.747	6.489
	H065T05	1828.391	453.023	4.036	2637733.538	400053.717	6.593
	H070T06	1841.871	448.192	4.110	2616711.289	389306.456	6.721
	H075T06	1857.349	440.891	4.213	2544802.015	369353.798	6.890
	H080T06	1888.305	434.737	4.344	2474618.256	348758.180	7.096
	H085T07	1902.880	422.827	4.500	2425357.247	329305.045	7.365

그림7과 표2는 중공비를 변화시켰을 때의 변위 연성도 및 에너지 연성도에 대한 결과 값이며 Park R.(1988)의 연구에 따라 최대 횡방향 하중의 75%점에 대한 할선강성과 최대 횡하중에 대한 수평선의 교점에 대한 변위를 항복변위로 결정하였으며 Strength Envelope Curve와의 교차점은 직선 보간하여 구하였다. 극한변위는 결과 값의 최대변위가 0.8Vmax때의 변위보다 작으므로 앞에서 정의한 바와 같이 극한변위를 최대변위로 정의하여 에너지 연성도는 $\mu_{\Delta 1}$ 으로 산정하였으며 변위 연성도는 μ_{E1} 으로 산정하였다.

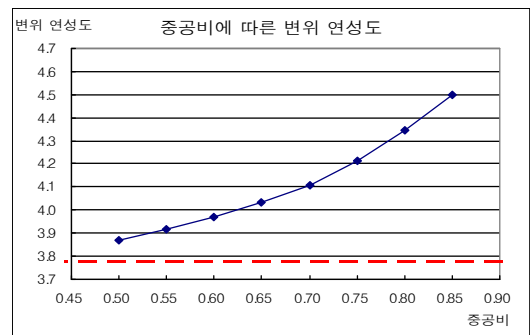


그림 8. 중공비에 따른 변위 연성도 곡선

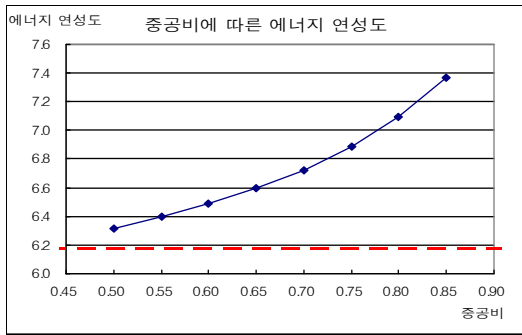


그림 9. 중공비에 따른 에너지 연성도 곡선

중공비가 커짐에 따라서 콘크리트 단면적은 줄어들고 연성도는 일정하게 증가한다. 그러므로 동일한 외경 내에서 중공비를 증가시키면 전체단면적이 줄어들어 부재가 받을 수 있는 최대하중은 줄어들지만 철근의 두께가 증가하므로 최대 변위량은 증가한다.

4.3. 중공에 따른 재료비 곡선

그림 10은 중공비에 따른 재료비 곡선이며 중공비가 커짐에 따라 재료비는 증가하는 경향을 보인다. 중공비가 커지면 콘크리트양은 줄고 강관의 양은 증가한다. 또한 최소 철근 필요 두께가 중공비가 증가함에 따라 mm단위로 선정함으로 인해 동일한 강관 두께를 사용한다면 중공비가 컸을 때가 콘크리트양은 작아지고 강재 사용량은 증가한다. 그림 10은 2006년도 9월 재료 단가기준으로 산정한 중공비에 따른 재료비 곡선이다.

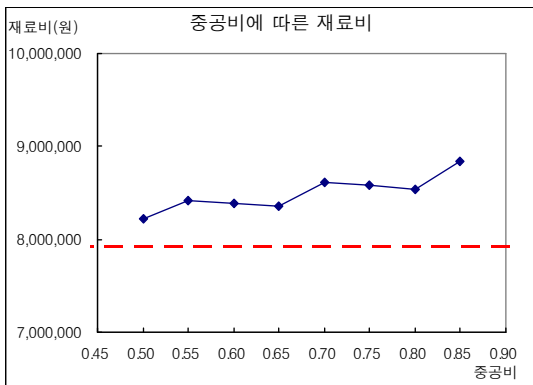


그림 10. 중공비에 따른 재료비 곡선

5. 결 론

본 연구는 중공비에 따른 강관으로 보강된 중공 R.C기둥에 대한 거동 분석한 결과 다음과 같다.

- (1) 중공비가 증가하면 중공비가 작은 단면에 비해 심부콘크리트의 단면적이 작아지므로 콘크리트가 부담해야하는 응력이 커지게 된다. 따라서 횡철근 사용량이 동일하고 중공비가 커지면 내

부 강관은 두꺼워야 한다.

- (2) 중공비의 변화량에 대해서 각 부재에 대한 단면적을 비교해 본 결과 ICH-R.C 기둥에서 동일한 외경 내에서 중공비를 증가 시키면 압축력은 중공비의 증가량에 대한 비율과 동일한 비율로 감소하고 휨모멘트력은 중공비의 증가량에 대한 비율 보다 작은 비율로 증가한다.
- (3) 중공비에 따른 작용하중에 대한 안전율 산정 결과 중공비가 커짐에 따라 안전율은 작아진다. 그러나 안전율은 작용하중에 따라 달라지므로 꼭 중공비가 커짐에 따라 안전율이 작아지진 않는다.
- (4) 중공비가 커짐에 따라서 연성도는 일정하게 증가한다. 동일한 외경 내에서 중공비를 증가시키면 전체단면적이 줄어들어 최대 수평력의 크기는 줄어들지만 철근의 두께가 증가하므로 최대 변위량은 증가한다.
- (5) 중공비가 커짐에 따라 콘크리트의 사용량은 작아지고 강관의 사용량은 커진다. 그러므로 그 당시의 재료에 대한 단가의 영향을 받는다. 본 연구는 2006년 9월에 대한 재료 단가 기준으로 산정한 결과 중공비가 증가함에 따라 강관 두께가 증가함으로 재료비는 증가한다.

감사의 글

본 연구는 한국건설기술평가원에서 시행한 2005년도 건설핵심기술연구개발사업 (과제번호: D02-01)의 연구비 지원에 의하여 수행되었기에 감사드립니다. 그리고 본 연구에 도움을 많이 주신 한택희 박사님께도 감사드립니다.

참고문헌

- [1] Taek-Hee Han, "Development of Enhanced Ductile Hollow Columns with Internal Confinement" 박사학위논문, Korea University, December, 2005
- [2] J. B. Mander, M. J. N. Priestley, and R. Park, "Theoretical Stress-Strain Model for Confined Concrete" ASCE, Journal of Structural Engineering, Vol 114, Number 7-9, 1704-1826, 1988
- [3] R. Park, T. Paulay, "Reinforced Concrete Structures" John Wiley & Sons, INC, 1975
- [4] 건설교통부, "도로교설계기준" 한국도로교통협회, 2006